

情報通信技術と水路網解析技術を応用した 災害時リアルタイム水運用制御システム

瀬古沢照治¹

¹ 非会員 工博 (株) 日立製作所 システム開発研究所 (〒215-0013 川崎市麻生区王禅寺 1099 番地)

現行の地震被害推定方式は、地震計データから震源・距離・震源規模などを推定し、表層地盤情報と地震動減衰式から地震分布、管路被害率を求め、破断個所を推定するという形である。これは、地震情報と被災モデルから破断個所を推定するもので、言わば情報のオープンループの形態であり1次推定に留まっている。また、緊急時だけに利用できるシステムは、機器利用の慣れや投資・構築コストの面で課題があった。

そこで、本研究では、平常時でも緊急時でも使用できるデュアルユースコンセプトに基づいた緊急時の水運用制御方式を展開した。まず、事例ベースに基づいた緊急時水運用方式を提案し、緊急時でも故障や破断を考慮した配水池群への最適水量配分支援を迅速に行える方式を示す。配水系においては、水需要分布の変動にリアルタイムで追従する配水制御方式を提案し、計測データに基づく需要変動の同定、管路網の漏水個所検出の可能性を示す。

さらに、震災時の配水管網のリアルタイム被害推定システムと平常時における保守作業支援システムについて示す。災害時リアルタイム水運用制御システムは、震災時の管路網の状況把握を情報通信技術と水路網解析技術を駆使し、実現するものである。最新のプロセス情報や災害調査情報をリアルタイムに取り込み、それに基づいて破断個所を再推定するもので、2次推定、3次推定が可能なフィードバックループ系の推定方式である。平常時における保守作業では、災害時の装置構成をそのまま利用し保守作業を支援する機能を示す。

Key Words: *real-time seismic damage estimation, dual use, network flow analysis, server and mobile*

1. はじめに

阪神・淡路大震災以降、都市におけるライフラインの確保が重要視され、さまざまな対策・検討が進められている。土木関連のハードウェア面では、特に埋設管路などの広域的水道施設の耐震化基準見直しが進められ、災害推定の見直しが進んでいる。

従来の地震土木学的手法の範疇では、地震被害推定方式は、地震計データから震源・距離・震源規模を推定し、表層地盤情報と地震動減衰式から地震分布を求める。さらに地震動と被害率相関から管路被害率を求め、破断個所などを推定するという形である。これは、推定過程において、時々刻々変化するプロセス情報や災害情報を取り込まないので、被災後の状況変化に対応するには限界があった。つまり、情報のオープンループの形態であり、1次推定に留まっている。

一方、技術進歩の著しいサーバ、モバイル端末などに代表される情報通信技術は、従来の被災推定方式の形態をも変革する要素を含んでいる。刻々変化する災害関連情報をリアルタイムで取り込める技術が発達してきた。しかし、単にリアルタイムに情報を取り込むだけでは利用価値は小さく、水運用の解析技術を駆使してこそ、その利用価値が大きくなる。本研究では、従来の範疇の留まらず、情報通信技術と水路網解析技術を水運用管理に応用した災害時リアルタイムシステムを創生する。

電機関連のソフトウェア面の重要性が増しているにもかかわらず、従来の計算機を利用した水運用管理は、ほとんどが平常時を対象としたシステムであった。緊急時には、現場情報を迅速に収集し、分析し、適切なアクションを起こすことが重要であり、これを支援する計算機制御システムが必要である。地震以外の原因でも、しばしば発生する漏水・断水

に対し、どのように水運用を行うかも課題である。さらには、平常時での設備耐震計画支援や、広域化、大規模化した水道施設の維持管理・保守の効率化、といった上水運用管理のための情報制御システムの構築が期待されている。

本稿では、平常時でも緊急時でも使用できるデュアルユースコンセプトに基づいた緊急時の水運用・制御システムを示す。このコンセプトは、コストパフォーマンス向上と普段の機器の使い慣れの必要性から、危機時のみならず平常時にも使用できるシステムとする事である。

2. 緊急時水管理システムと技術の位置づけ

水供給における緊急時の水管理情報システムを

図1に示す。緊急時における水管理システムに必要な機能を検討するという視点から図1を左右に分ける。左部は、水道施設の運用管理制御をする運用管理センタを中心とした広域水運用制御システムを示し、右部では、水道局本局を中枢部とする管路状況管理システムを示すものである。左部は、取水から配水までの円滑な水の流れを支援するシステム機能として、導送水系の緊急時水運用システムがあり、配水系では緊急時の配水制御システムがある。右部の、管路状況管理保守を目的としたシステムには、緊急時には被災影響推定機能があり、平常時には保守・工事作業支援機能がある。右部では、デュアルユースコンセプトにより平常時でも緊急時でも使用できるように、その機器構成を同一にしている。

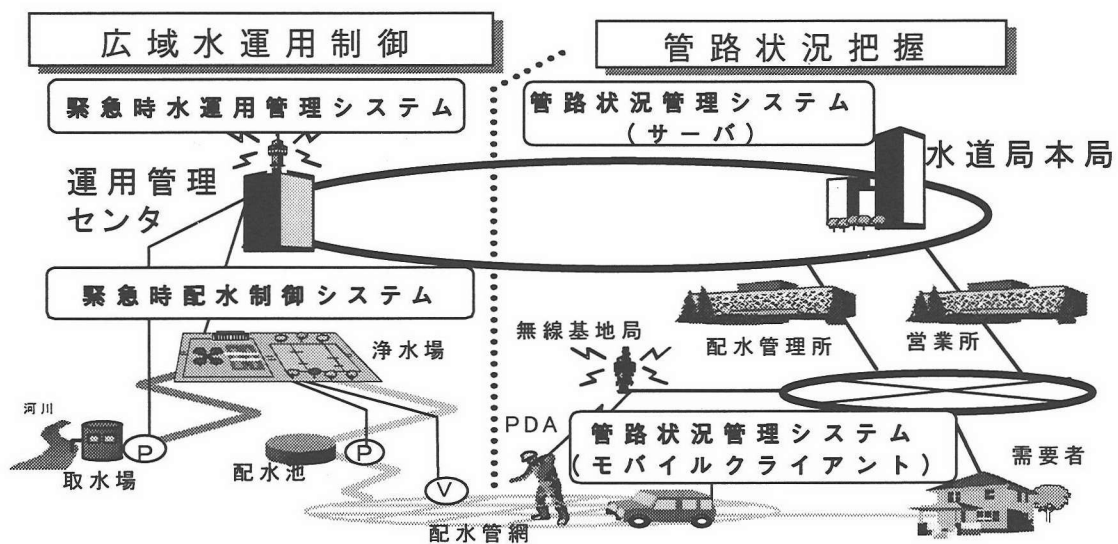


図 1 緊急時水管理情報システム

3. 事例ベースと多層ネット最適化による緊急時水運用管理システム

3. 1 水運用計画の課題

水の取水場から浄水場に至る導水系および浄水場から配水池に至る送水系の水運用を対象にする。需要が時々刻々変動するのに対し、浄化処理は簡単には水処理速度を変更できない。そこで、配水池は需要の変動を吸収するのと災害時の水量確保の役割を持っている。

水運用計画支援とは、広域の需要端での需要を予測し、水源からの取水量、浄水場での浄化量、および、導送水管の配分量を計算し、送水ポンプの運転計画、浄水場の稼働計画を時間単位で決めることである。緊急時とは、地震や渇水あるいは水源事故に

よる取水停止、浄水場ダウン、導送水管の破損といった場合である。緊急時には、平常時以上に迅速かつ危機状況に対応した臨機応変な運用が不可欠となる。

従来においては、想定される事故事例について、運用計画を平素から検討しておき、緊急時にはそれらに最も類似した事例に対応した運用計画案を実災害状況に適合するよう修正して計画値を求めるといった対策が執られた。この手法の特徴は、事例をヒントにして問題解決に取り組むことが人間に分かり易いという点にある。しかし、事故の想定には限界があり、想定した事故事例だけでは不十分である。想定される災害と実際に起きる事故災害とは隔たりがあり、そのまま事前事例に対する対策を適用しても運用要求を満足させられない場合が多い。これ

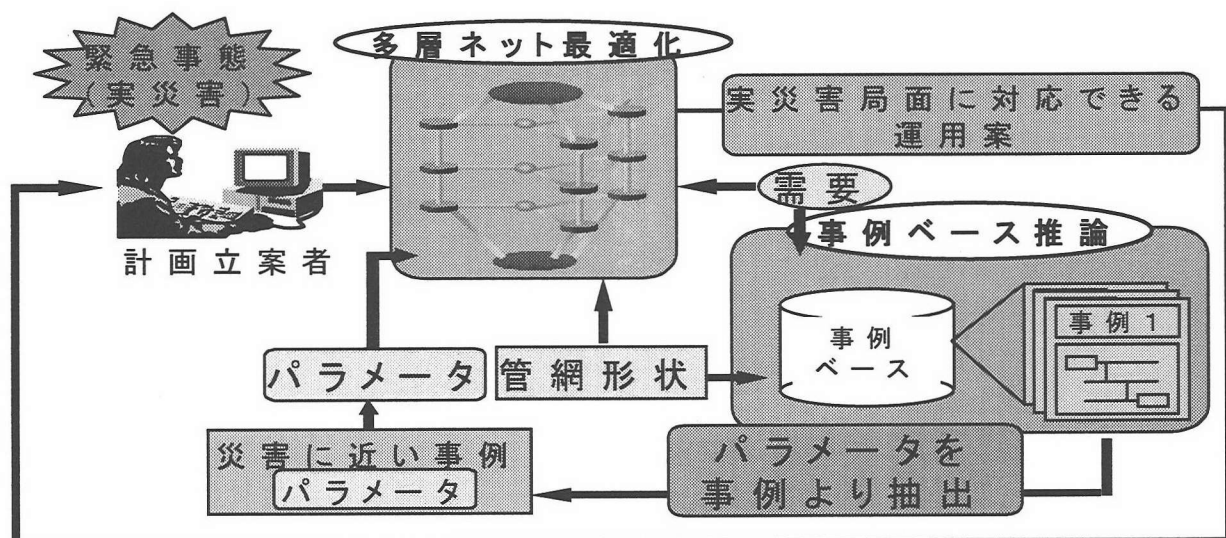


図2 事例ベース+多層ネット最適化による水運用計画システム

を如何にして事例を修正していくかが問題になる。

3.2 「事例ベース推論+多層ネット最適化」による水運用管理

水運用計画策定作業を計算機で支援することで、迅速に且つより最適な運用計画の立案が可能な緊急時水運用支援システムの概要を図2に示す。

このシステムは、事例ベース推論により運用案を検索し、実災害に合致させるために最適化手法により運用案を修正して最終運用案を作成するものである。平素の準備として、想定した事事故事例や実際に発生した事例と、それらに対応する運用計画値を対話的に作成し事例データベースとして格納しておく。緊急時には、実際に発生した事故の状況（需要、施設、水系、配水池等の状況）を検索キーとして事例データベースより、最も類似した事例を抽出し運用原案を作成する。しかし、「類似例として抽出された事例と現況の事故との隔たり」の問題を埋めるには、何らかの最適化計算が必要になる。これを解決するために、多層ネットワークモデルを用いる。多層ネットは、複数時間にまたがる動的な運用計画を静的な最小費用流問題として解くものである。

これにより、実際の緊急時の状況に対応できる運用計画案が創出でき、迅速で臨機応変な水運用が可能になる。

4. 緊急時配水制御システム

4.1 配水制御の課題

配水池から需要家の管網内の配水系を対象にする。配水池に貯えられた水は、網目状に張り巡らされた

配水管網を介して、圧力をかけて各需要家へ送り届けられる。常に適切な水量を需要家を得るためには、管網の圧力をどの地域も一定にしておかねばならない。しかし、需要量は時間的広域的に変化するのに伴って圧力も大きく変化する。配水制御は、需要家の変動需要量に対し、圧力が定値化するように、管路網内の複数のポンプやバルブを操作調整するものである。

平常時においては、日々の需要パターンが季節、曜日などの変動はあるものの比較的傾向にあるため、圧力定値化は従来の手法で可能である。しかし、管路破断、漏水といった緊急時には、管路網内の分布的な需要パターンが通常とは異なり、更に破断・給水制限対応のための弁操作や加圧ポンプ操作停止などにより管路の接続状態も異なってくる。さらに、管網の状況や需要量を緊急時には事前に把握できない。

4.2 緊急時配水制御手法

この問題を解決するために、漏水および需要分布をオンラインで推定する手法を開発し、これらを図2の様に組み合わせて、緊急時にも対応可能な配水制御システムを構成した。解析計算によって得られる圧力、流量の値と計測によって得られる圧力、流量の値との二乗誤差が最小になるよう需要を推定するものである。

図3のように、管路内の複数の計測点（流量計、圧力計）データに基づき、需要分布を推定する。従来の管網解析手法が、需要量を境界条件として入力し、流量、圧力分布が得られるのに対して、本手法は、限られた点数の流量、圧力計測情報から需要分

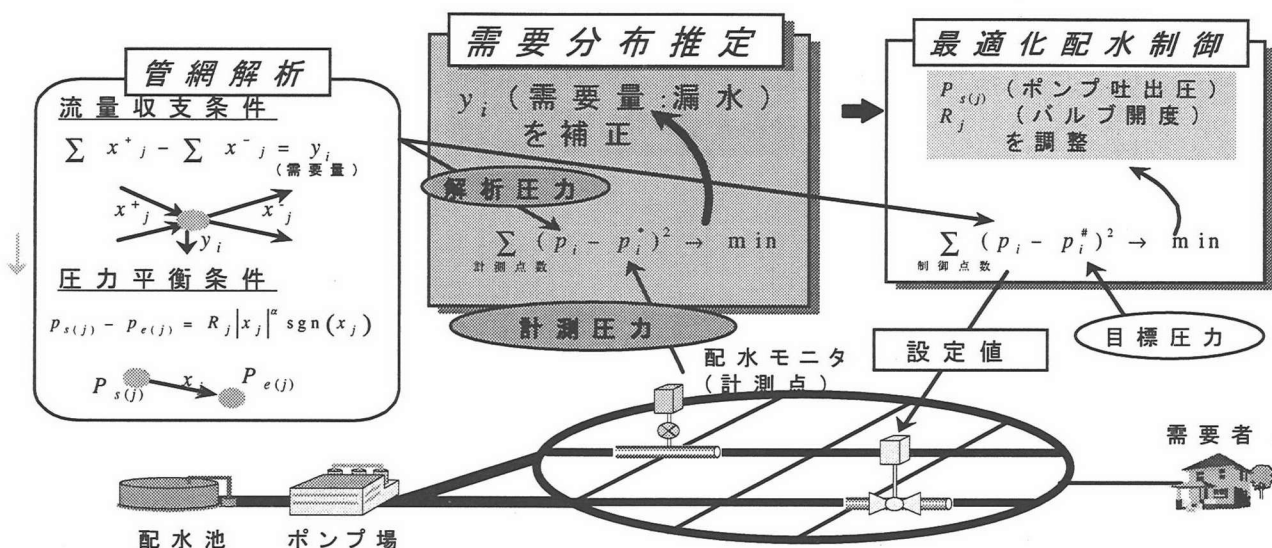


図 3 緊急時配水制御システム

布を推定する手法である。言い替えれば、逆管網解析とも言える。広域的な需要分布の変動を推定し最適配水制御を行う手順を示す。

- (1)：管網解析を行う。管網解析は管網を構成する全ての節点と管路をつぎの流量収支式と圧力平衡式を解く。
 - (2)：需要点、管路に設置した圧力・流量計より得られる計測圧力 p_i^* と解析圧力を最小化する需要量 y_i を推定する。
 - (3)：推定需要量 y_i を基に、目標圧設定点における圧力の計算値と目標値が最小になるようにポンプ出力、バルブ開度を求め操作支援する。
- これらにより、リアルタイムで漏水や需要量を考慮した配水制御が可能になる

5. 管路状況把握システム

平常時でも緊急時でも使用出来るデュアルユース

コンセプトに基づいた、被災時の配水管網のリアルタイム被害推定システムと平常時における保守作業支援システムについて示す。震災時には、即時に管路網被災状況を把握できる事が必須である。被害推定システムは、情報通信技術と管網解析技術を駆使して構築できる。デュアルユースとして、地震時の被災影響推定と、平常時の保守作業支援の両面の使用形態を併せ持つ管路状況把握システムのプロトタイプシステムの構成を図4に示す。

水道局本局側にサーバを設置し、現場ではペンP Cや携帯電話を組み合わせたモバイル端末を作業員のが携帯し、それぞれ公衆網や無線通信網を利用して通信する。

情報通信技術を応用したサーバとモバイル端末のシステムは、緊急時には、被災影響推定を行うことが出来、平常時には、管路保守作業支援として使用することが出来る。つまり、デュアルユースを目的に構成したものである。

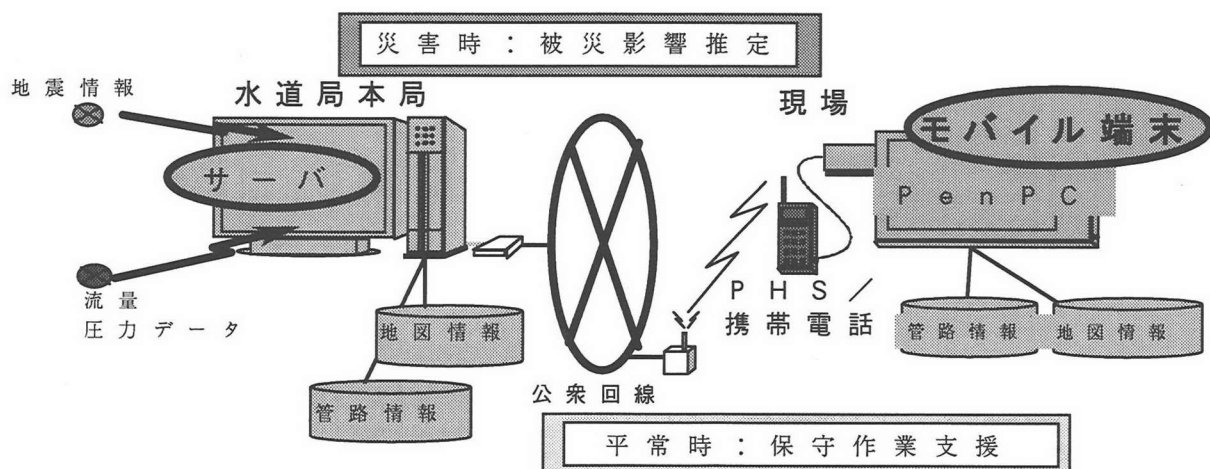


図 4 管路状況把握のプロトタイプシステム

5. 1 被災影響推定

緊急時における被災影響推定機能の処理内容を図5に示す。サーバ側では管路被害推定と断水領域推定を行い、モバイル側では被害情報収集を行う。

管路被害推定は、基本的には、地震データに基づいてメッシュ毎の破断箇所数を出力するもので、従来手法の範疇にある。まず、地震計のデータから震源距離、震源方位、震源深さ、マグニチュードを推定し、地震動減衰式から計算せれる地盤震度と表層地盤情報から震度分布を求める。次に、管種係数と被害相関式から管路被害率を求め、さらに、被害率と管種年度別管路長を乗じて破断箇所をメッシュ毎に推定する。この管路被害推定処理は、地震の情報に基づいて推定するもので、オープンループ系の1次推定であり、従来手法はこの部分で留まっていた。

このシステムの特徴は、断水領域推定と被害情報収集にある。断水領域推定は、水道システムに特有な、発災直後から復旧までの時間スパンでの推定を考えており、時々刻々変化する圧力計や流量系からのプロセスデータに基づいて、災害の2次推定をする。ここで、漏水量を見積り、断水地域と断水人口を推定する。2次推定の結果である漏水量を管路被害推定にフィードバックし、破断箇所の再推定をして、被災推定精度を向上させることができる。この様に1次推定だけでは得られない発災後の変化をプロセスデータから捉え、推定精度の向上を図ることができる。

モバイル端末側の被害情報収集は、無線通信可能な携帯端末などを利用し、管路被害の3次推定を行

う。サーバ側で2次推定された被害情報を入力し地図画面面上に表示する。地図画面面上の2次推定結果を参考に現地調査し、得られた実際の被害情報を、モバイル端末を介してサーバにフィードバックする。

サーバでは、被害調査情報を収集し、いくつかの新しい被害実体状況に基づき被害状況を再計算する。これにより、実体情報を加味した推定が行えるので、被害推定精度は向上する。この方法は3次推定にあたる。再度、その結果を現場に配信し、この手順を繰り返すことで徐々に精度を上げることができる。図6に1次推定と3次推定の管路被害状況を示す。3次推定では、プロセス情報と調査情報を取り込んでいる分推定精度が向上している。

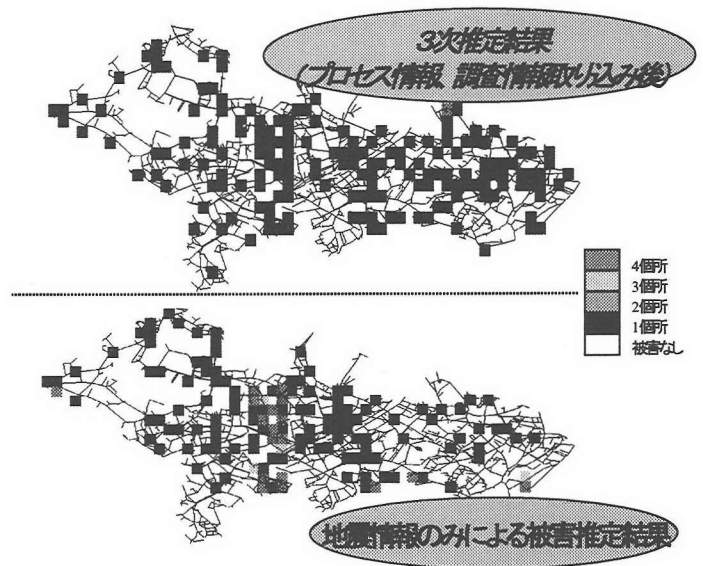


図6 管路被害推定結果(1次推定と3次推定の比較)

5. 2 保守・工事作業支援

平常時における保守・工事作業支援を考える。保守作業で、例えば減圧による節水や管路工事などのためにバルブ操作を施す必要がある。このバルブ操作は管路内の流れの状態を変化させ、周囲の流量・圧力分布に敏感に影響を及ぼす。ここでは、上述したサーバとモバイル端末の装置構成をそのまま利用し、保守作業を支援する。保守作業には、小径管網をも考慮した流量・圧力分布を把握が必須であり、これを本システムでは実現する。

配水管理所のサーバ側では、計測された流量、圧力データと主要管網データに基づいて、管網全体の圧力分布（現地での管網解析の境界条件）を計算しておく。一方、現地では、モバイル端末上に担当地区（ローカル地域）の詳細図面情報とそれにリンクした需要分布や管路属性を提示できるようにしておく。作業者は、その地域

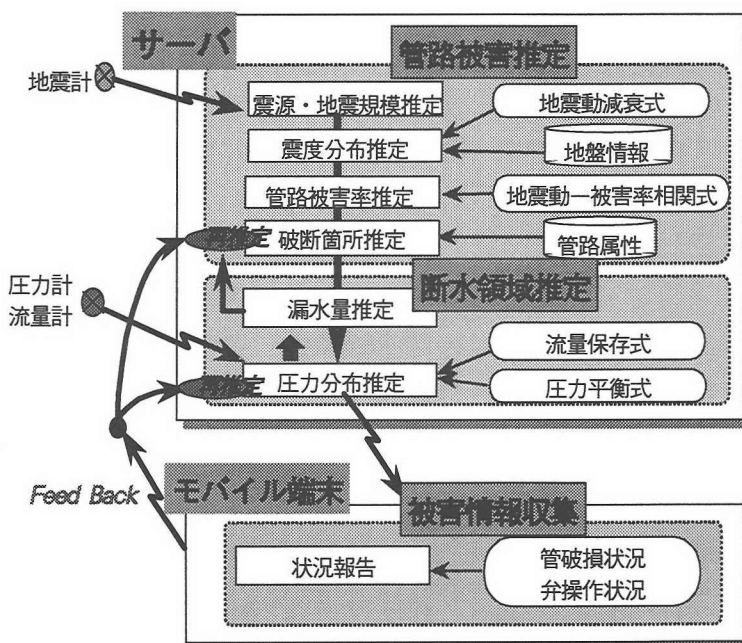


図5 被災影響推定(緊急時)

でバルブを操作して、工事を始めるが、その工事やバルブ操作の影響がどのようになるかを事前に把握できる。つまり、サーバ側で求めた隣接主要接点（境界条件）をモバイル端末側で探索し、その接点を境界条件として、詳細管網の圧力、流量分布を計算し地図上に表示できる。この様子を図7に示す。このようなサーバとモバイルの協力による管網の流れ解析は、従来の集中型システムでは不可能であった。サーバとモバイルの計算の分担により可能になった。これにより、工事作業に必要な詳細管路の流量圧力分布を把握できる。作業の報告なども容易に行え、維持管理業務の正確さと効率向上に有効であると共に、地図情報と管路情報を統合により経験の浅い作業者にも容易に扱える。

6. まとめ

上水道における緊急時の水運用・制御について、管路解析技術や最適化技術を中心としたシステム制御技術と情報通信技術の統合により、リアルタイムでの対応が可能になることを示した。災害対策や設備維持支援のために、基本的に要求される機能が何かを示し、その機能を情報制御技術の応用により実現できる可能性を示した。特に、強力な管路解析手法をベースとして、渇水・断水時にも配水制御ができるシステムを示し、また、緊急時でも故障などを考慮した運用最適配分支援システムを示した。

さらに、地震時の初動支援を行うための管路状況把握システムを示しモバイル端末の応用による状況収集、詳細作業支援などを検討した。

平常時でも緊急時でも使えるデュアルユースの実形態を示した。平常時で使い慣れたシステムでの緊急時対応や、コストパフォーマンスの面でも有効な水運用システムのプロトタイプを示した。

参考文献

- 1) 福本、他：需要分布の変動にリアルタイムに追従する配水制御手法、第47回水道研究発表会講演集、1996
- 2) 宮岡、他：最小費用流計算による管網解析手法、電気学会論文誌 Vol.101-D, 1981
- 3) 栗栖、他：数理解析法とヒューリスティック法を組み合わせた動的計画技法の上水道運用計画問題への適用、計測自動制御学会論文集、Vol.30, 1994
- 4) 瀬古沢：上水道における緊急時水運用管理システム、計測自動制御学会 産業システムシンポジウム、1996
- 5) 瀬古沢、他：緊急時の水運用とその制御システム、水道管路国際シンポジウム、1997
- 6) 中村：研究展望：総合地震防災システムの研究、会論文 No.531, 1991
- 7) 山崎、他：地震動モニタリングに基づく都市ガス導管網警報システム SIGNAL の開発、第9回日本地震工学シンポジウム、1994

図1 緊急時水管理情報システム

図2 事例ベース+多層ネット最適化による水運用計画システム

図3 緊急時配水制御システム

図4 管路状況把握のプロトタイプシステム

図5 被災影響推定（緊急時）

図6 管路被害推定結果（1次推定と3次推定の比較）

図7 バルブ操作シミュレーション

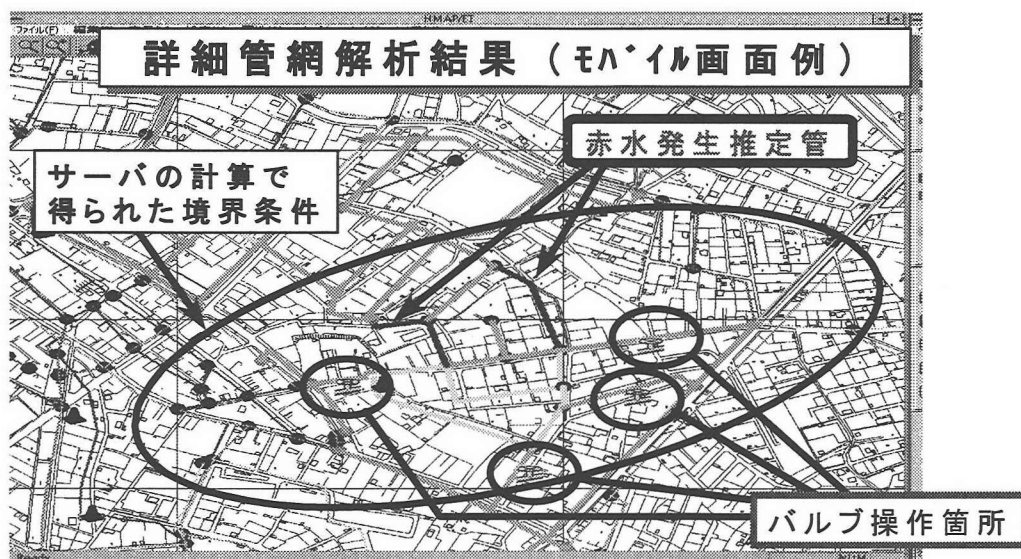


図7 バルブ操作シミュレーション